

Quelle est la place de l'erreur dans l'apprentissage moteur et musical ?

Sommaire

INTRODUCTION	1
I - LA PLACE DE L'ERREUR DANS LES THEORIES DE L'APPRENTISSAGE	2
A- Définitions et distinctions.....	3
B- Perception et statut de l'erreur	3
1)- Modèle transmissif : la faute.....	3
2)- Modèle béhavioriste : le bogue	4
3)- Modèle constructiviste : l'erreur comme outil	4
II- L'APPRENTISSAGE MOTEUR	5
A- Activité cérébrale	6
B- Le contrôle optimal par rétroaction.....	7
C- La pratique et la mémoire motrice.....	7
D- Le retour d'information/feedback	8
E- Consolider l'acquis, vers l'automatisation	8
III- L'APPRENTISSAGE MUSICAL DU POINT DE VUE DES NEUROSCIENCES.....	9
A- Le cerveau des musiciens	9
B -Entraînement musical et plasticité cérébrale	11
CONCLUSION	13

INTRODUCTION

Nous sommes tous en tant qu'individus et à plusieurs moments de nos vies, confrontés à un rôle d'apprenant, d'élève cherchant à intégrer une information. Dans ce processus d'assimilation, nous rencontrons des étapes, pouvant être marquées par des erreurs, nous empêchant d'effectuer une action initialement prévue.

Selon la vision que l'on a de ces erreurs, découle une multitude de possibilités et de choix quant à leur prise en compte et la poursuite d'un objectif.

J'ai souhaité prendre ce recul en tant que professeur, afin d'avoir une vue d'ensemble et être consciente de ce qui entre vraiment en jeu dans l'apprentissage, y étant confronté quotidiennement, afin d'accompagner au mieux chaque élève vers son objectif. Je ferais donc naturellement un parallèle avec la matière du chant, apprentissage moteur, pour répondre à cette problématique :

Quelle est la place de l'erreur dans l'apprentissage moteur et musical ?

Nous débuterons ce tour d'horizon en observant les principaux courants de pensées sur l'apprentissage, et la mise en lumière de l'erreur à l'intérieur de ces schémas.

Nous aborderons d'un point de vue scientifique les mécanismes en action lorsqu'un élève est confronté à une difficulté motrice.

Enfin nous observerons en détail les modifications cérébrales apportées par l'activité musicale du point de vue des neurosciences, et en tirerons une conclusion quant au traitement de l'erreur dans cet apprentissage.

I - LA PLACE DE L'ERREUR DANS LES THEORIES DE L'APPRENTISSAGE

Pour commencer, nous pouvons présenter trois visions théoriques de l'apprentissage :

- **Le modèle transmissif :** Considérée comme la plus ancienne des théories didactiques, elle s'inspire des travaux de *John LOCKE (1632-1704)*. Elle est nommée également comme modèle d'enseignement direct : un enseignant qui détient le savoir, qui se charge d'instruire l'élève placé en récepteur. Il s'assure de la bonne qualité du message transmis (clarté, organisation, progression, illustration par des exemples) et tous les élèves reçoivent le même contenu au même rythme.
- **Le Béhaviorisme : apprendre c'est transmettre** des savoirs, en renforçant des comportements. Le béhaviorisme définit l'apprentissage comme une modification durable du comportement résultant de la conséquence d'un entraînement particulier. *Skinner, 1953 (1.)*
- **Le constructivisme : apprendre c'est construire** des images de la réalité dans des situations d'action. Le modèle constructiviste considère « l'apprendre » comme le résultat d'une construction des savoirs. Pour *Jean Piaget*, celui qui apprend n'est pas simplement en relation avec les connaissances qu'il apprend. Il organise son monde au fur et à mesure qu'il apprend en s'adaptant. Cet auteur insiste sur la nature adaptative de l'intelligence et sa fonction organisatrice et structurante. Cela implique deux processus d'interaction de l'individu et son milieu : l'assimilation et l'accommodation. Il ne suffit pas de voir, de percevoir (théorie empiriste), mais il faut agir et expérimenter. **(2.)**

A- Définitions et distinctions

Faisons tout d'abord la distinction entre l' « erreur » et « la faute ».

Le terme « faute » vient du mot « fallita » du verbe « fallere », qui désigne faillir, tromper ou duper. La faute est considérée comme « le fait de manquer, d'être en moins. » ; « Le manquement au devoir, à la morale, d'une règle d'une science, d'un art, etc » **(4.)**

L' « erreur » du latin error, qui signifie « écart, errance, détour », ou « un acte de l'esprit qui tient pour vrai ce qui est faux ». **(5.)**

L'apprenant est tenu responsable de sa faute (négligence passagère, manque de concentration, rapidité ou de mal attention).

L'erreur est plutôt vue comme un symptôme de la manière dont l'apprenant affronte un type d'obstacle, de l'incapacité de l'apprenant à comprendre, et le point de départ de la connaissance. **(6.)**

B- Perception et statut de l'erreur

Jean Pierre Astolfi, professeur en sciences de l'éducation et ayant conduit des recherches en didactique des sciences, **(7.)** reprend nos trois modèles abordés concernant l'erreur :

Le modèle transmissif, le modèle comportementaliste et le modèle constructiviste.

1)- Modèle transmissif : la faute

Le premier modèle évoqué, le modèle transmissif, suppose que l'élève ne sait rien de ce qu'il va apprendre et que le professeur est un spécialiste de ce qu'il va enseigner. Ce dernier va transmettre ses savoirs sans les déformer et dans le cas où les élèves sont attentifs, et à l'aide d'un peu de mise en pratique (ex : exercices), ils finiront eux aussi petits spécialistes de ce qu'ils auront fini de voir. Cependant cette méthode suppose que si l'élève commet des erreurs, il en est responsable puisque cela viendra de son inattention, d'une mauvaise écoute ou d'une mauvaise adaptation à la situation didactique.

L'erreur fait donc ici de l'élève un élève fautif, elle est soumise à la sanction, notamment lors des évaluations.

2)- Modèle béhavioriste : le bogue

Le second modèle, le modèle comportementaliste ou béhavioriste, suppose une assimilation de l'homme (l'élève) à l'animal en ce que l'homme comme l'animal est toujours capable d'apprendre de nouvelles choses y compris les plus difficiles à comprendre lorsque leur enseignement est décomposé par étapes successives. **(8.)**

L'enseignant se charge de décomposer le problème en plusieurs étapes successives afin que l'élève ne commette pas d'erreur.

Avec ce modèle, comme avec le précédent, les erreurs ne devraient normalement pas survenir, puisque toute la programmation didactique par " petites marches " est élaborée avec un souci constant de les éviter. La différence est quand même importante puisqu'ici, si des erreurs malgré tout se produisent en dépit des précautions didactiques prises, elles seront moins imputées à la responsabilité défaillante de l'élève qu'à la manière dont a été pensée la progression didactique par l'enseignant ou le manuel. À l'idée de faute se substitue celle d'un " bogue ", comme on dit en informatique : puisqu'il y a un " os " dans un programme qui ne " tourne " pas conformément aux prévisions, il appartient au formateur de le réviser et de le réécrire. Reste que tant d'énergie déployée pour en éviter sa survenue montre bien que l'erreur conserve ici un statut toujours négatif et dévalorisé. **(9.)**

3)- Modèle constructiviste : l'erreur comme outil

Enfin, le troisième modèle, le modèle constructiviste, sur lequel l'Approche Communicative puis la Perspective Actionnelle se sont adossées, consiste à ne plus considérer l'erreur comme une faute à éradiquer mais à faire avec pour qu'elle disparaisse.

L'erreur ici a un statut plus positif, constituant pour l'enseignant un indice important du savoir initial de l'apprenant.

« Apprendre c'est franchir progressivement une série d'obstacles », selon PIAGET. En effet, dans cette théorie, l'apprentissage passerait obligatoirement par des moments de difficultés face auxquels les élèves doivent remplacer leurs anciennes conceptions erronées par de nouvelles correctes. Pour apprendre, l'élève doit prendre conscience de ses erreurs, de son fonctionnement mental. Elles doivent être analysées, ont un sens caché dû à l'expérience personnelle de l'élève et de ses représentations. L'erreur est ici un obstacle et vient d'une conception que possède déjà l'élève (en raison de son expérience personnelle).

Ce dernier modèle fait de l'erreur non pas une faute mais un outil pour progresser même si son but demeure celui d'en faire un élément qui doit disparaître.

Aujourd'hui l'erreur possède donc un statut qui s'est revalorisé, un statut négatif atténué. Elle apparaît comme un moyen de valoriser les apprentissages par ce qu'elle sous-

entend et acquiert donc un rôle didactique pour le professeur. À partir de l'erreur le professeur essaie de comprendre le cheminement de l'élève ou apprenant, et ainsi d'y remédier tout en adoptant une stratégie afin que cet apprenant assimile cette remédiation pour ne plus reproduire son erreur. **(10.)**

II- L'APPRENTISSAGE MOTEUR

Voyons maintenant comment l'erreur apparaît dans le cerveau, et comment elle est traitée en situation d'apprentissage moteur.

L'apprentissage moteur est un processus interne. Cela signifie que c'est un processus cognitif qui se déroule dans le système nerveux de celui qui apprend. Ce processus interne permet à un élève de modifier son comportement chaque fois qu'il est confronté à une tâche vis-à-vis de laquelle il n'a pas encore de réponse adaptée. Il n'est donc pas encore capable de répondre à un but qui est fixé par lui. Ne pouvant pas observer ce processus d'apprentissage, on va l'évaluer seulement au travers de la performance. Ce changement progressif doit être durable et engendre des possibilités de développement des habiletés. On observe une modification du comportement qui doit résulter exclusivement de l'exercice. Dans ce cas, nous excluons tous les facteurs de maturation, de croissance ou de vieillissement. Lorsque les modifications comportementales sont le produit de la répétition de la même tâche, on parle d'apprentissage par exercice et lorsque ces modifications sont dues à l'accomplissement de tâches différentes, on parle d'apprentissage par transfert. D'une manière générale, deux contrepoints apparaissent :

- L'apprentissage a une fonction adaptative : l'individu va s'adapter, s'ajuster à son comportement.
- La modification comportementale est sous le contrôle cognitif.

Le processus d'apprentissage moteur comprend trois stades : **le stade cognitif, le stade associatif, et le stade automatique.** (*Loi de Fitts*), **(11.)**

Au **stade cognitif**, l'individu connaît chaque séquence de la tâche à réaliser, mais il ne sait pas exactement comment l'exécuter.

Le stade associatif correspond au raffinement des habiletés motrices et à la diminution d'erreurs. La performance à la tâche devient aussi plus consistante. C'est l'étape de fixation de l'habileté. Les gestes deviennent plus efficaces. Son coût énergétique diminue, la régularité de l'habileté augmente. On observe une coordination possible des différents patrons de mouvement pour produire l'action. La performance va s'améliorer progressivement et les élèves commencent juste à ce stade à détecter leurs erreurs. Ce stade dure généralement plus longtemps que le précédent. **(12.)**

Au **stade automatique**, le dernier stade, les habiletés motrices sont apprises et maîtrisées, peu d'efforts cognitifs sont demandés.

Les approches basées sur les théories de l'apprentissage moteur tiennent habituellement compte de quatre variables principales : les étapes d'apprentissage, le type de tâche à réaliser, la pratique et le feedback.

A- Activité cérébrale

Voyons ce qu'il se passe pendant le stade associatif au niveau cérébral.

L'un des mécanismes d'acquisition de nouvelles compétences motrices consiste à minimiser les erreurs d'un essai pratique à l'autre. Un grand nombre d'études indiquent que les voies cérébelleuses jouent un rôle dans ces processus adaptatifs de réduction des erreurs motrices. Une région du **cortex préfrontal médian**, y compris le **cortex cingulaire antérieur**, a été associée aux processus de surveillance des performances et de détection des erreurs pour les tâches cognitives. Des résultats récents soutiennent l'idée que cette région est également sensible à la commission d'erreurs motrices. En outre, les **noyaux des ganglions de la base** présentent également une activité neuronale qui varie en fonction des erreurs et des récompenses. **(13.)**

Après une erreur, les sujets répondent moins vite et commettent, en général, moins d'erreurs. Ce « ralentissement post-erreur » révèle qu'un système superviseur contrôle la performance et déclenche, après une erreur, des ajustements stratégiques visant à éviter d'en commettre une autre. Ce système superviseur contrôle peut-il aussi contrôler les actions en cours et corriger les erreurs avant même qu'elles ne soient accomplies ?

Effectivement, le système superviseur détecte les activations incorrectes et parvient le plus souvent à les inhiber (ébauches d'erreur). En cas d'erreur, la diminution de l'activité musculaire témoigne du fait qu'une d'inhibition a quand même été déclenchée mais qu'elle a échoué. À un niveau plus central, un potentiel évoqué par la réponse (appelé négativité d'erreur [Ne]), dont la source (ou l'une des principales sources) est l'aire motrice supplémentaire, est sensible à la performance : la Ne est très ample dans les erreurs, plus petite dans les ébauches d'erreur et plus petite encore (mais présente cependant) dans les réponses correctes. Cette sensibilité de la Ne à la performance est une autre manifestation de l'existence d'un système superviseur. L'étude de la Ne montre que ce système est fragile : non seulement l'atteinte des structures préfrontales supprime la sensibilité de la Ne à la performance, mais encore, cette sensibilité est diminuée par le vieillissement normal, des doses modérées d'alcool, une nuit sans sommeil ou même simplement la fatigue due à la longueur d'une expérience. **(14.)**

B- Le contrôle optimal par rétroaction

Todorov et Jordan ont développé la théorie du contrôle optimal par rétroaction, dans laquelle la rétroaction sensorielle et les connaissances antérieures sont combinées en une "estimation d'état" de la situation actuelle qui est intégrée au but de l'action pour spécifier dynamiquement les réponses motrices optimales requises. Le concept clé est celui de "l'intervention minimale".

Il s'agit d'une avancée significative par rapport aux théories précédentes qui pouvaient définir un plan optimal avant une action, mais ne pouvaient pas facilement modifier le plan pour faire face aux variations intrinsèques de son exécution ou aux changements de l'environnement externe.

Cependant, le changement dans les gains de contrôle est sélectif. Il ouvre également de nouvelles questions intéressantes sur les représentations neuronales dans le système moteur.

Le cerveau comprendrait donc des modèles internes qui capturent les propriétés de réponse des articulations et des muscles qu'il contrôle, et qu'il dispose probablement de différents modèles pour différents contextes. *Wolpert et Kawato* ont suggéré que plusieurs modèles internes contribuent à chaque commande motrice, combinés en fonction de leur responsabilité dans le contrôle du contexte moteur. Le modèle ayant une responsabilité élevée a plus de contrôle. Les résultats de *White et Diedrichsen* suggèrent une alternative inconfortable : **les modèles responsables de l'erreur, et non du contrôle, se taillent la part du lion dans la tâche de correction et dans l'apprentissage. (15.)**

C- La pratique et la mémoire motrice

Le but de l'étude suivante **(16.)** était d'analyser la relation entre : **l'apprentissage moteur, la mémoire motrice et la détection des erreurs** dans une tâche de lancer de balle.

La moitié des sujets devaient estimer leurs propres erreurs avant de connaître les résultats, ce qui constitue une **mesure de la reconnaissance des erreurs**. La performance sur le lancer de la cible s'est améliorée avec la **pratique**, tandis que la performance sur le lancer de la reproduction est restée inchangée. La précision du lancer de la cible tendait à atteindre la précision du lancer de la reproduction au fur et à mesure de la pratique.

Ainsi, la **mémoire de rappel** semblait être une limite à l'amélioration des performances.

De plus, la corrélation entre les performances du lancer sur cible et du lancer sur reproduction a augmenté au cours de la session d'entraînement. Les sujets ayant une mauvaise **mémoire motrice** ont cessé d'améliorer leur performance au lancer sur cible après quelques essais, alors que les sujets ayant une bonne mémoire motrice ont continué à progresser tout au long de la session. La performance au test de transfert

était également corrélée à la **mémoire motrice**.

Ainsi, les processus de mémoire de rappel précis semblaient être critiques pour l'apprentissage moteur et le transfert. En revanche, la détection des erreurs était faible et ne changeait pas avec la pratique.

Aucune relation n'a pu être trouvée entre la capacité de détection des erreurs et la précision du lancer pendant l'entraînement et le transfert. De plus, les sujets engagés dans la détection des erreurs n'ont pas mieux appris que ceux qui n'ont pas évalué leurs propres erreurs pendant l'entraînement.

Ainsi, la mémoire de rappel semblait jouer un rôle plus important que la mémoire de reconnaissance dans l'acquisition et le transfert de l'habileté de lancer, du moins dans ces situations où la connaissance des résultats était fournie après chaque essai.

D- Le retour d'information/feedback

Le cortex génère des prédictions et intègre les erreurs de prédictions. La différence crée un signal d'erreur qui va se propager dans le cerveau et qui va permettre de corriger et d'améliorer la prédiction suivante. Le retour d'information est donc essentiel. Le cerveau fonctionne ainsi par itérations, avec des cycles qu'on peut décomposer en quatre étapes successives : **prédiction, feedback, correction, nouvelle prédiction**. Il internalise organiquement des statistiques. Il s'agit tout simplement de continuellement corriger le tir grâce au retour d'expérience, ce qui revient à dire que l'erreur est fondamentale. En effet, si les signaux d'erreur nous permettent, à nouveau, d'ajuster nos prédictions, l'apprentissage ne peut se déclencher que s'il y a un signal d'erreur, autrement, rien ne change. On privilégiera la motivation par le renforcement positif et la récompense – immatérielle. Il s'agit de conclure un succès par un renforcement social : une approbation, une validation, un encouragement.

E- Consolider l'acquis, vers l'automatisation

Il s'agit d'être dans une situation, ou plutôt un stade où le cortex préfrontal est fortement mobilisé par l'attention exécutive. Et, point culminant d'un apprentissage, l'enjeu sera d'accomplir le transfert de l'explicite vers l'implicite. En effet, progressivement, en se transférant vers des réseaux non conscients, plus rapides, plus efficaces, le cerveau parvient à une **automatisation**. On libère le système **du cortex préfrontal** qui redevient disponible. On retrouve également dans notre cortex le phénomène de goulot d'étranglement, qui là encore évoque une mémoire vive informatique, une mémoire tampon qui avant de passer à la suite ne peut traiter qu'un volume donné d'informations à la fois. Lorsque tout le « pourcentage de ressources » de notre « unité centrale » est sollicité dans le décodage, on ne peut pas se concentrer sur le sens par exemple. Le phénomène d'**automatisation** est donc crucial car il libère des ressources de haut niveau. **(17.)**

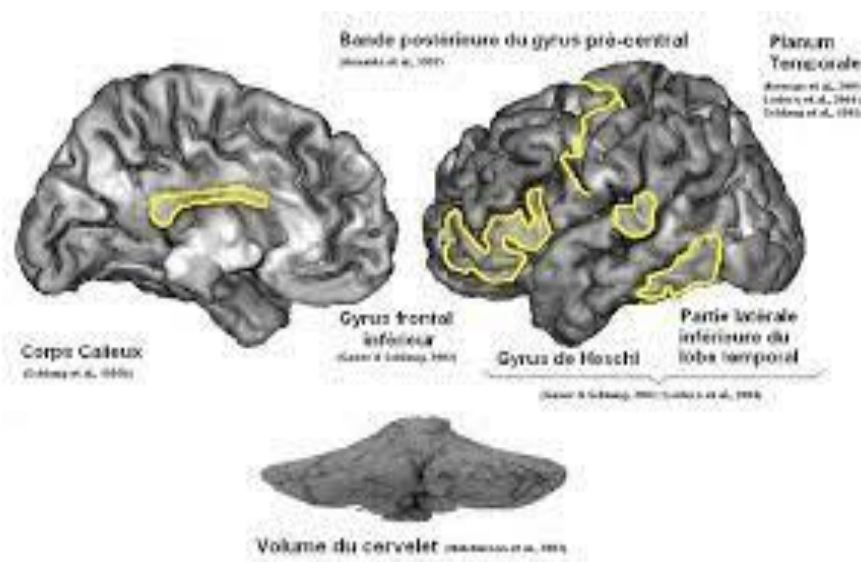
III- L'APPRENTISSAGE MUSICAL DU POINT DE VUE DES NEUROSCIENCES

A- Le cerveau des musiciens

Précisons les termes « musiciens » et « non-musiciens ». Le « musicien » est celui qui a appris, pendant au moins 10 ans, des techniques musicales, instrumentales et la théorie de la musique (ce niveau s'apparente à un niveau fin d'études au Conservatoire National de Région et aux musiciens professionnels). On peut parler pour ce sujet, d'expertise musicale. En ce qui concerne les enfants musiciens (versus les enfants non-musiciens), on parle en général d'enfants de 8-9 ans, ayant commencé la musique très tôt et ayant acquis, de ce fait, une expertise musicale notable. Les non-musiciens sont les sujets qui n'ont pas suivi d'apprentissage musical spécifique en dehors des enseignements généraux de musique dispensés dans le cadre scolaire.

Grâce à l'avancée des techniques en imagerie par résonance magnétique (IRM) ou en imagerie fonctionnelle électrique (EGG et MEG décrite en 2e partie), on a constaté que le musicien présente un cerveau différent du non-musicien. Son cerveau s'est modifié au fil de sa pratique et de son expérience musicale. Ces adaptations cérébrales concernent la cognition et la modification morphologique du cerveau.

En voici quelques exemples :



Expansion du cortex auditif

Le cortex auditif du musicien a une taille anormalement importante puisqu'elle représente 130% de celle du non musicien.

Modification du cortex sensitivomoteur

Une performance musicale demande un contrôle très rapide des mouvements complexes mais également une surveillance auditive continue. Les stimuli sensitifs doivent être traités extrêmement rapidement, ce qui engendre de nouvelles acquisitions motrices et donc une réorganisation fonctionnelle du cortex sensori-moteur.

Expansion du corps calleux

Le corps calleux est la commissure transversale principale qui unit les deux hémisphères cérébraux. Il est indispensable à l'intégration et à la communication inter hémisphérique. Sa taille est proportionnelle au nombre de neurones qui le constituent et de ce fait, à la capacité de transfert d'informations d'un hémisphère à l'autre. La surface du corps calleux chez le musicien est plus importante que chez le non musicien. La musique a entraîné une modification anatomique de ce dernier ce qui provoque une communication inter hémisphérique meilleure et plus rapide.

À titre d'exemple, plusieurs équipes ont démontré par IRM que la communication entre les deux hémisphères serait favorisée chez les musiciens par des corps calleux de taille supérieure **(14)**. Le volume total de ce dernier est de $665 \pm 91 \text{ mm}^2$ et $619 \pm 70 \text{ mm}^2$ chez les musiciens (hommes) et non-musiciens respectivement **(15.)** Les résultats montrent des différences très significatives lorsque les résultats sont obtenus au niveau de la zone antérieure du corps calleux. De manière inattendue, ces auteurs mettent en évidence un effet genre, puisque cette augmentation n'est pas observée chez les femmes musiciennes, suggérant que cela pourrait être lié à une organisation cérébrale initialement plus symétrique chez les femmes.

Augmentation du volume du cervelet

Le cervelet joue un rôle important dans l'apprentissage moteur et dans certains processus cognitifs (l'automatisation par exemple). Dans une étude réalisée par Schlaug (1995), **(16.)** la taille du cervelet des musiciens a été mesurée et montre qu'il est plus important que celui des non musiciens alors que le volume total du cerveau est comparable.

Substance blanche et substance grise

Il y a, chez les musiciens, une différence d'architecture de la substance blanche et de la substance grise. La substance blanche est responsable de la propagation des informations dans le système nerveux. L'apprentissage de la musique développe des processus moteurs et cognitifs très fins, ce qui a pour conséquence la création de nouvelles connexions intracérébrales provoquant une nouvelle organisation de la substance blanche. En ce qui concerne la substance grise, elle a pour fonction de recevoir les messages, d'examiner les informations et de préparer les réponses. On note chez le musicien une augmentation de sa densité dans l'aire de Broca qui est associée à la production du langage. La comparaison directe entre les sujets musiciens et non-musiciens montre un volume de matière grise plus important dans certaines régions du

cerveau **(17.)**

Faisceau arqué

Le faisceau arqué est une sorte de boucle neurale, un important faisceau de fibres nerveuses, qui lie l'aire de Broca et l'aire de Wernicke (associée au traitement des paroles entendues). Il est majoritairement présent dans l'hémisphère gauche. De récentes études révèlent une impressionnante différence de taille des faisceaux arqués chez les musiciens.

Des études en IRM fonctionnelle ont rapporté une activation de l'aire de Broca durant des tâches de perception musicale **(18.)** durant des tâches actives telles que le chant **(19.)** ou même lorsque les participants imaginaient jouer d'un instrument.

B -Entraînement musical et plasticité cérébrale

Quand nous parlons ici de modification, on doit entendre que les structures corticales sont amplifiées en volume, mieux et plus connectées entre elles : ni plus ni moins, le cerveau des musiciens est plus développé précisément dans des structures-clés liées à l'apprentissage (perception, traitement, production du langage), mais aussi en globalité via la densification des réseaux de fibres neurales entre ces structures des deux hémisphères cérébrales **(20.) (21.)**.

L'entraînement musical améliore aussi la motricité en général et pas seulement les mouvements en lien avec la musique. Par exemple, les musiciens imitent des séquences de gestes données avec plus d'exactitude que des non-musiciens **(22.)**. De nombreux travaux ont mis en évidence l'impact de la musique à la fois sur les aires cérébrales relatives à la motricité et à l'audition **(23.)**.

Ces travaux ont été confirmés par *Brown (2007)* et par *Zatorre (2007)* qui ont montré que l'écoute de morceaux musicaux active des régions cérébrales motrices mais que c'est bien la pratique qui les modifie **(24.)**.

Une des caractéristiques du cerveau consiste à s'organiser et se réorganiser en fonction de l'expérience. Cette capacité démontre que le cerveau n'est pas figé et qu'il possède de multiples possibilités de régénération de ses fonctions. Même si la neuropsychologie parle de pré-cablage du cerveau (il est, en effet, le produit de nos gènes), elle insiste depuis une trentaine d'années sur la plasticité cérébrale qui correspond aux modifications permanentes que nos expériences et nos apprentissages créent tout au long de notre vie.

Habib et Besson (2008) (25.) indiquent qu'un entraînement musical intensif a pour conséquence de modeler des structures corticales et sous-corticales dans le sens d'un accroissement de leur surface. *Rosenkranz (2007) (26.)* découvre que la stimulation motrice trans-crânienne activée par l'entraînement musical augmente la plasticité cérébrale. Les chercheurs s'intéressent à la plasticité d'aires cérébrales spécifiques liée

à l'entraînement musical car ils pensent qu'en débutant tôt l'apprentissage de la musique, cela peut augmenter la plasticité générale du cerveau et ainsi améliorer les apprentissages dans d'autres domaines, notamment dans le traitement du langage.

De manière intéressante, des effets de la musique sur la plasticité peuvent également être observés à moyen et court terme, chez l'enfant comme chez l'adulte. Ainsi, des modifications anatomiques dans les aires auditives et motrices ont été mises en évidence par IRM après 30 min de piano par semaine, pendant 15 mois, chez des enfants de 6 ans, initialement non-musiciens au démarrage de l'étude **(27.)**.

Des auteurs ont montré que la plasticité à court terme du cortex auditif existe toujours chez des personnes adultes **(28.)**. De tels effets ont été montrés chez des adultes écoutant un morceau musical 3 h/jour pendant 3 jours. En supprimant une fréquence donnée (1 kHz), la réponse neuronale à cette fréquence est abaissée **(29.)**. D'autres travaux utilisant la fIRM ont montré que l'écoute de sons plaisants et déplaisants (dissonants) suscite des émotions dont l'effet est directement corrélé à une activation élevée de l'hippocampe, du cortex inférieur frontal latéral et de la partie antérieure du gyrus temporal supérieur **(30.)**.

(31.)

(33.)

Les sciences cognitives ont identifié quatre facteurs principaux de réussite d'un apprentissage : l'attention, l'engagement actif, le retour d'information, et enfin, la consolidation.

CONCLUSION

Nous avons pu voir que l'erreur a un statut différent selon les approches didactiques. Grâce à l'évolution des théories de l'apprentissage, nous pouvons observer une revalorisation de son rôle comme un outil permettant au professeur de trouver de nouvelles stratégies de compréhension et de transmission.

L'élève quant à lui, opère un processus de détection d'erreur et d'ajustement, au stade d'apprentissage associatif dans l'apprentissage moteur. En partant du postulat que le cortex préfrontal joue un rôle essentiel en traitant les signaux d'erreur continuellement, grâce au retour de prédiction notamment, l'erreur est considérée comme fondamentale dans l'apprentissage, ce dernier ne pouvant se déclencher que si elle existe.

Nous avons vu que les musiciens professionnels présentaient des adaptations cérébrales concernant la cognition et la modification morphologique du cerveau. Il a été remarqué une expansion de plusieurs zones, telles que le faisceau arqué, le cervelet, le corps calleux. L'expansion du cortex sensori-moteur met en lumière notre intérêt pour le traitement de l'erreur notamment, puisqu'il justifie une réorganisation fonctionnelle grâce à son système de traitement extrêmement rapide des stimuli sensitifs musicaux, engendrant ainsi de nouvelles acquisitions motrices.

Sources

1. *Science and Human Behavior*– Skinner, 1953
2. Jean Piaget, *Recherches sur l'abstraction réfléchissante*, 1977.
3. L.S. Vygotsky. *Mind in Society: Development of Higher Psychological Processes*
4. *Le Petit Larousse Illustré*, 1972 : p.420
5. *Le Nouveau Petit Robert*, 2007 p.121
6. *La pédagogie de l'erreur*, Edu Tice, 2021
7. *L'erreur, un outil pour enseigner*, Paris, ESF, 1997. *La Didactique des sciences* – 2002
8. Y. Reuter (2013), *Panser l'erreur à l'école*, Presses Universitaires du Septentrion, p.25 8/54
9. *Place de l'erreur dans l'apprentissage* – EduTech Wiki
10. *Accompagner la construction des savoirs de Rosée Morissette en collaboration avec Michelin Voynaud*
11. *Loi de Fitts*, In Wikipédia
12. *Cours :Science de la motricité*, Institut Supérieur du Sport et de l'Education Physique de Ksar-Said
13. *Error-Based Motor Learning. Advances in experimental medicine and biology*
14. Vidal, Franck. « *Neurophysiologie de l'erreur* ». *Revue Neurologique, Journées de Neurologie de langue française* 2015
15. Miall, R. C. (2010). *Motor Control: Correcting Errors and Learning from Mistakes. Current biology: CB*, 20, R596-8
16. Dupuis, J., et Bernard Thon. « *Motor learning, motor memory, and error processing: A correlational study in a ball throwing task* ». *Cahiers de Psychologie Cognitive: Current Psychology of Cognition* 19 (1 août 2000): 395 415.
17. Schaug, 1995b; Gaser, 2003 ; Lee, 2003
18. Lee, 2003
19. Schlaug, 1995
20. Bermudez and Zatorre, 2005
21. Koelsch et al., 2022
22. Ozdemir et al, 2006
23. Keller et Just, 2009
24. Paré, Matthieu. « *Musique, cerveau et éducation* », 2016.
25. Spilka, 2010
26. Chen, 2006
27. Huang, 2010; Pantev, 2011
28. Habib et Besson (2008)
29. Rosenkranz (2007)
30. Hyde, 2009
31. Pantev, 1999; Wan, 2010
32. Koelsh, 2006

33. *Culcasi, Par Emmanuel. « Vers la compréhension des modifications physiologiques et neuro-anatomiques induites par la pratique musicale. Apport des études scientifiques. », Les quatre piliers de l'apprentissage, ou ce que nous disent les neurosciences. Stanislas Dehaene , 2020*